

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 4568-95. Калий хлористый. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1996. — 16 с.
2. Матусевич Л.Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. — М.: Химия, 1963. — 304 с.
3. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. — М.: Химия, 1977. — 368 с.
4. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. — М.: Недра, 1985. — 285 с.
5. Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н., Эскин Г.И. Основы физики и техники ультразвука. — М.: Высшая школа, 1987, — 352 с.
6. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). — М.: Химия, 1983. — 192 с.
7. Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалун А.В. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. — Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. — 400 с.
8. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голямина. — М.: Советская энциклопедия, 1979. — 400 с.
9. Ультразвуковая технология / под ред. Б.А. Аграната. — М.: Металлургия, 1974. — 503 с.

Поступила 01.02.2012 г.

УДК 537.528:537.529:622.233

ШПУРОВОЕ РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД И БЕТОНА

Н.А. Иванов, М.И. Пивоваров, Н.В. Войтенко, А.С. Юдин

Томский политехнический университет
E-mail: nikina11@sibmail.com

Исследованы процессы шпурового разрушения горных пород и бетона с использованием электровзрывного полиэтиленового картриджа. Приведены результаты лабораторных измерений тока, напряжения; произведен расчет сопротивления канала разряда и динамики энерговыделения в нем при инициировании разряда взрывающимся проводником как в воде, так и в полиэтиленовом капилляре. Установлено, что в канале капиллярного разряда выделение энергии в первый полупериод колебаний тока на ~15 % выше, чем в канале разряда в воде. Показано, что при запасенной энергии в емкостном накопителе ~30 кДж происходит электроразрядное разрушение образцов размером до 100×60×60 см.

Ключевые слова:

Электровзрыв, электроразрядное разрушение, капиллярный разряд, негабарит, передающая среда, электровзрывной полиэтиленовый картридж.

Key words:

Electrobust, plasma blast technology, capillary discharge, oversize, transfer media, polyethylene electoexplosive cartridge.

Введение

В горнодобывающей промышленности и строительстве существует проблема, связанная с ограничением использования взрывчатых веществ для разрушения твердотельных крупногабаритных блоков естественного и искусственного происхождения (глыб горных пород, бетонных блоков и изделий) — «негабаритов». Взрывчатые вещества экологически небезопасны, требуют эвакуации персонала из места проведения взрывных работ, осколки при взрывах могут повреждать коммуникации и строения. При разрушении прочных горных пород (гранит, известняк) механические способы малоэффективны и дорогостоящи. Возможным решением проблемы является применение электроразрядного разрушения горных пород. Широкое распространение получил электроразрядный способ с применением емкостного генератора импульсных токов [1–3], где в качестве среды, передающей ударную волну, используется вода. С одной стороны, её недостаток — низкая по сравнению с разрушаемым материалом акустическая жесткость, что уменьшает коэффициент передачи волны давления

от канала разряда в разрушаемый материал, а также проблема её удержания в горизонтальных шпурах. С другой стороны, вода пластична, поэтому нет потерь энергии на измельчении в приканальной области. Другим фактором, определяющим эффективность разрушения, является скорость ввода энергии от накопителя в канал разряда, которая косвенно зависит от материала, находящегося с разрядным каналом в непосредственном контакте.

Таким образом, поиск доступного материала, позволяющего более эффективно доставлять энергию накопителя в разрушаемый материал, является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование электровзрывного разрушения «негабаритов» с использованием в качестве передающей среды пластичного, не измельчаемого вблизи разрядного канала материала — полиэтилена с более высокой по сравнению с водой акустической жесткостью.

Механизм разрушения электровзрывом

Прочность горных пород и бетона, как и всех других хрупких материалов, на растяжение значи-

тельно ниже, чем на сжатие. Наиболее энергетически выгодным способом является разрушение за счет растягивающих напряжений, возникающих при отражении упругой волны от свободной поверхности [4].

Электровзрыв – это комплекс взаимосвязанных процессов: инициирование и развитие разряда, нагрев и расширение плазмы канала за счет её резистивного нагрева, сопровождающийся генерацией ударных и в последствии акустических волн, которые создают разрушающие деформации в материале. Скорость ввода энергии в канал разряда максимальна в случае равенства активного сопротивления разрядного контура его волновому сопротивлению:

$$r_{ex} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (*)$$

где $r_{ex} = r_z + r_{ch}$ – полное активное сопротивление контура (r_z , r_{ch} – активное сопротивление контура и разрядного канала); L – индуктивность контура; C – ёмкость. В реальных условиях для увеличения радиуса действия установки необходимы длинные подводящие шины, что повышает индуктивность контура. Оценки показывают, что для выполнения условия (*) длина канала разряда должна быть десятки см. Инициирование канала разряда при таких межэлектродных расстояниях требует высокого (0,2...0,7 МВ) напряжения. Это усложняет конструкцию и ограничивает область применения технологии. Снизить напряжение пробоя до 10...20 кВ возможно при инициировании канала разряда взрывающимся проводником.

Схема электроразрядного разрушения твердых материалов представлена на рис. 1. Сопротивление r_z и индуктивность L складываются, соответственно, из сопротивления и индуктивности конденсаторной батареи C , искрового промежутка в газоразрядном коммутаторе S , ошиновки и подводящего кабеля – 1. Картридж – 2, используемый в качестве передающей среды, представляет собой сплошной цилиндр из пластичного материала (или вещества) с высокой акустической жёсткостью, например, полиэтилена, парафина и т. п., в центральной оси которого помещен взрывающийся медный проводник.

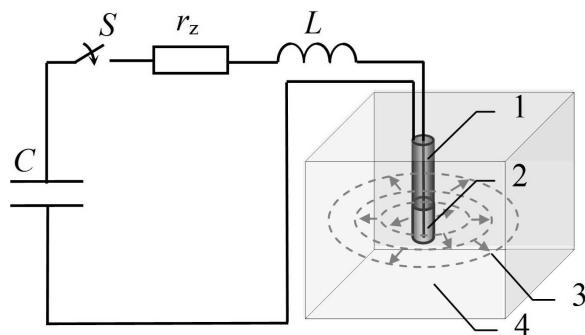


Рис. 1. Схема электроразрядного разрушения твердых материалов: 1) коаксиальный подводящий кабель; 2) картридж (медный проводник в полиэтилене); 3) ударно-волновое возмущения в материале, генерируемые расширением канала; 4) разрушаемый материал

В момент срабатывания коммутатора S , батарея C начинает разряжаться через проводник, что приводит к его взрыву и образованию металлической низкотемпературной плазмы с концентрацией частиц $10^{19}...10^{21} \text{ см}^{-3}$ и температурой $10^3...10^4 \text{ К}$ [3]. После формирования канала разряда, накопленная в батарее конденсаторов энергия выделяется в плазму. Мощность при разряде может достигать сотен МВт [4]. Быстрое выделение энергии в малом объёме приводит к повышению давления в канале до нескольких ГПа. В результате происходит расширение плазменного канала разряда с образованием ударной волны, которая формирует упругую и пластическую волны – 3, распространяющиеся в материал – 4, через передающую среду. Под воздействием упругой волны в материале формируются напряженно-деформированные состояния, изменяющиеся в диапазоне от десятков до сотен МПа, вызывающие образование, рост трещин и, в конечном итоге, разрушение материала.

Исследование энерговыделения в разрядном канале в капилляре и воде

Исследование энерговыделения в канале разряда в воде и в капилляре из полиэтилена проводилось на генераторе с зарядным напряжением 10 кВ, ёмкостью 12 мкФ, индуктивностью 1,067 мкГн, активным сопротивлением $r_z = 0,0197 \text{ Ом}$. Выбор полиэтилена в качестве стенки капилляра и материала, передающего ударную волну, обусловлен высокой акустической жёсткостью и пластичностью, что позволяет избежать значительных потерь энергии на измельчение, образование трещин в приканальной области и увеличить энергию волны, передаваемую от канала разряда в разрушаемый материал на ~20...25 % [4, 5]. Из литературных данных [6] известно, что при капиллярном разряде в воздухе амплитуда давления выше, чем в разряде, не ограниченном стенкой. Предполагается наличие подобного эффекта и в конденсированных средах. Для подтверждения этого предположения были проведены эксперименты по определению скорости энерговыделения в канале разряда в капилляре и в воде. Капилляр выполнялся в сплошном полиэтиленовом цилиндре диаметром 24 мм. Разряд иницировался взрывающимся медным проводником диаметром 0,15 мм. Эксперименты проводились в цилиндрической емкости диаметром 40 см, заполненной водой. Для повышения статистической достоверности измерений взрыв проводника проводился не менее трех раз. Регистрировались осциллограммы тока и напряжения, усреднённые данные которых представлены на рис. 2 и 3.

Пик перенапряжения 3 (рис. 3), обусловленный взрывом проводника, соответствует моменту спада тока 3 (рис. 2) и пропорционален $L \frac{di}{dt}$.

Энергия, вводимая в канал разряда, рассчитывалась по осциллограммам тока и напряжения путём интегрирования мгновенной мощности:

$$W = \int_0^{T_0} U(t) \cdot i(t) dt,$$

где U – напряжение; i – ток; W – выделяемая энергия; T_0 – время выделения энергии. Динамика выделения энергии в канале капиллярного разряда и воде представлена на рис. 4.

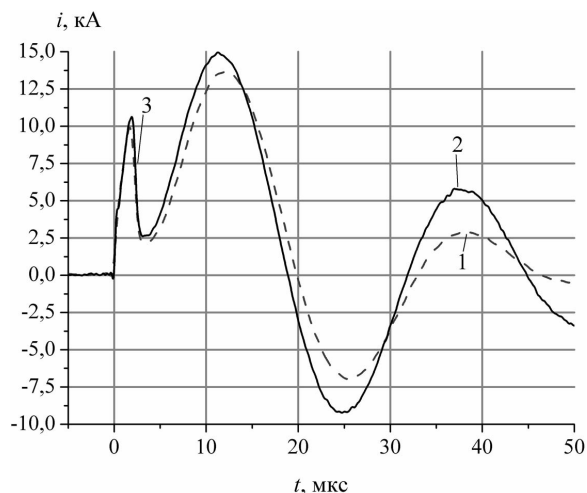


Рис. 2. Осциллограммы тока разряда в капилляре и воде. Здесь и далее данные с маркером 1 – взрыв в полиэтиленовом капилляре, 2 – взрыв в воде, 3 – момент взрыва проводника

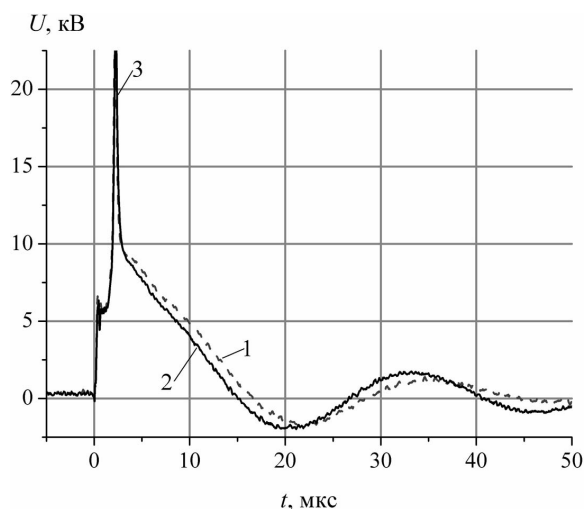


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на канале разряда в капилляре и воде

Из рис. 2, 4 видно, что скорость выделения энергии в канале капиллярного разряда, ограниченного полиэтиленом, выше, чем в канале разряда, ограниченного водой, что доказывает выдвинутое предположение о большей амплитуде давления при капиллярном разряде. По осциллограммам тока было определено активное сопротивление канала разряда $r_{ch} = r_{ex} - r_z$. Для этого рассчитывалось активное сопротивление контура при работе на разрядный канал $r_{ex} = \frac{2L \ln \Delta}{T}$, а затем из него вычиталось сопротивление контура, полученное из опыта на коротком замыкании ($r_z = 0,0197$ Ом).

Здесь r_{ex} – активное сопротивление контура; T – период колебаний; Δ – декремент затухания тока. Сопротивление разрядного канала в капилляре составило $r_{кап} = 0,225$ Ом, в воде $r_{вод} = 0,131$ Ом. Видно, что активное сопротивление в капиллярном разряде примерно в два раза больше, чем в разряде без капилляра и, соответственно, мощность выделения энергии в первую полуволну на ~15 % больше (рис. 4). Это показывает возможность использования свойств капиллярного разряда для увеличения амплитуды и крутизны фронта ударной волны.

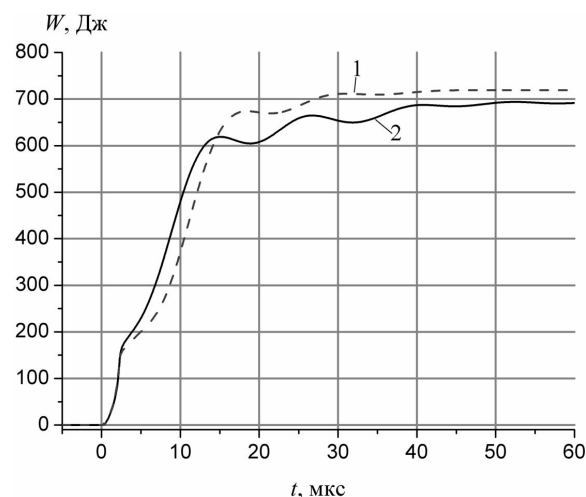


Рис. 4. Выделение энергии в канале разряда от времени

Модельное разрушение «негабаритов»

На основании предварительных исследований было проведено модельное разрушение «негабаритов» и откол на свободную поверхность в условиях, приближенных к промышленным. Для этих целей был сконструирован генератор импульсных токов со следующими параметрами: $U = 20$ кВ; $C = 168$ мкФ; $W = 33,6$ кДж; $L = 1,21$ мГн; $r_z = 0,01$ Ом. Иницирование разряда проводилось с помощью взрывающегося медного проводника диаметром 0,37 мм, помещенного в полиэтиленовый картридж, внешний вид и эскиз которого представлен на рис. 5. Длина канала разряда (картриджа) изменялась от 60 до 100 мм.

С целью согласования момента взрыва проводника, полученного в лабораторных условиях, параметры генератора и иницирующего проводника рассчитывались на ПЭВМ, с применением модели, подробно описанной в [7]. В экспериментах регистрировались ток и падение напряжения на канале разряда.

В качестве «негабаритов» использовались бетонные блоки марки В-40 размером 100×60×60 см и камни кварцита и песчаника размерами 60×40×30 см. Шпуров диаметром 26 мм сверлились в центре «негабаритов». Образцы, разрушенные в ходе экспериментов, показаны на рис. 6.

Оценка эффективности разрушения в зависимости от длины проводника проводилась как визуально, рис. 6, так и с помощью обработки осцилло-

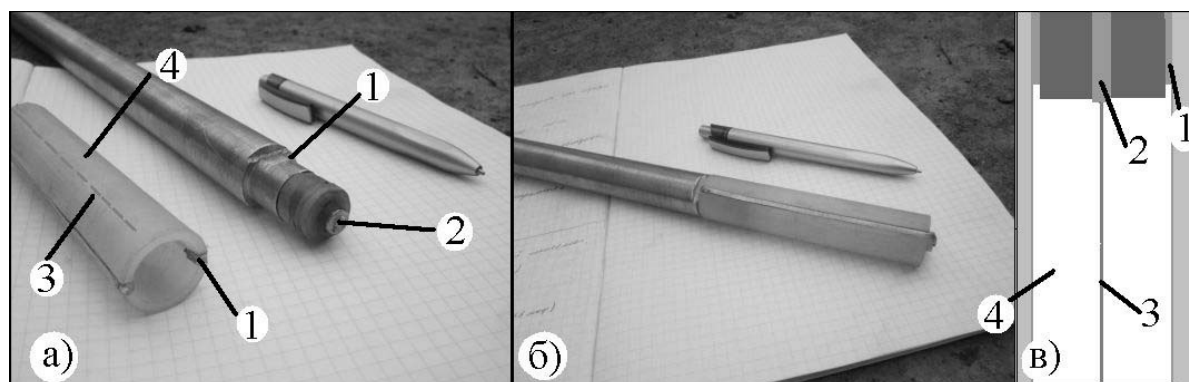


Рис. 5. Внешний вид и эскиз полиэтиленового картриджа: а) полиэтиленовый картридж для электроразрядного разрушения и электродная система; б) картридж и электродная система в сборе; в) схема картриджа; 1 – заземлённый электрод, 2 – высоковольтный электрод, 3 – взрывающейся проводник, 4 – корпус картриджа

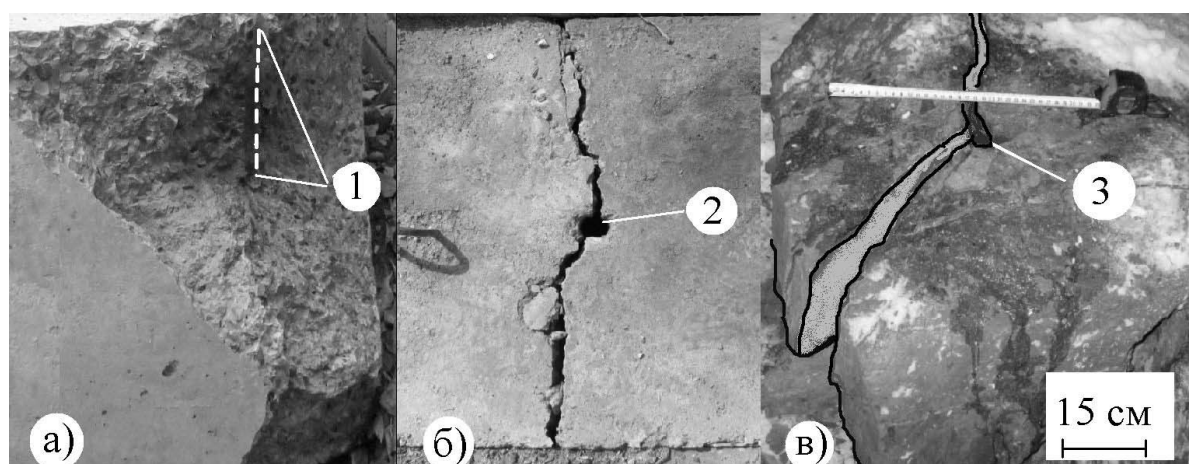


Рис. 6. Пример разрушения блоков и горных пород электровзрывом: а) откол на свободную поверхность; расстояние от стенок 25 см, глубина шпура 25 см; б) разрушение «негабаритов»; бетонный блок, шпур в центре, глубина 30 см; в) разрушения камня песчаника; шпур в центре, глубина 25 см; 1–3 – места закладки электровзрывного картриджа

грамм тока и напряжения. Было замечено, что более эффективное разрушение наблюдалось при длине взрываемого проводника 100 мм. Это явление объясняется увеличением сопротивления разрядного канала при увеличении его длины, и, как следствие, более согласованным режимом работы генератора. В результате повышается эффективность ввода энергии в канал разряда. По осциллограммам, полученным в результате модельного разрушения, была построена зависимость энергосодержания от длины разрядного канала (рис. 7), подтверждающая факт более эффективного разрушения, при увеличении длины взрываемого проводника.

Полученные в ходе модельного разрушения «негабаритов» данные подтверждают возможность использования полиэтилена как в качестве образующего капилляр пластичного материала, так и в качестве передающей ударную волну среды. Первое позволяет формировать более крутой фронт ударной волны, а второе – более эффективно передавать ударные возмущения в разрушаемый материал.

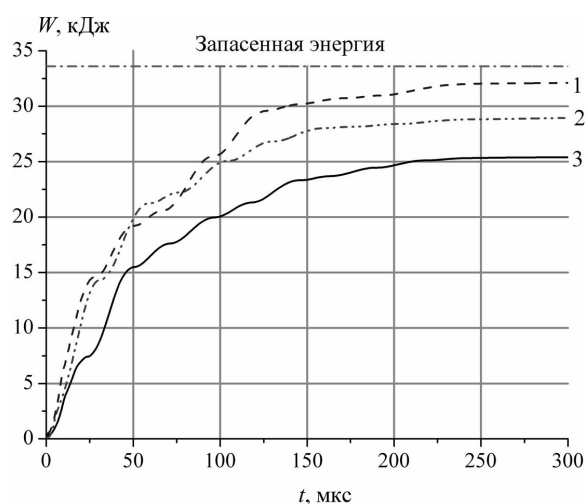


Рис. 7. Зависимость количества вводимой в разрядный канал энергии от длины инициирующего проводника: Длина: 1) 100; 2) 80; 3) 60 мм

Выводы

1. Показана возможность использования свойств капиллярного разряда для увеличения скорости ввода энергии в разрядный канал и, соответственно, увеличения амплитуды и крутизны фронта ударной волны.
2. Установлено, что активное сопротивление в капиллярном разряде больше, чем в разряде без капилляра за счет ограничения области развития разряда. Это обеспечивает согласование сопро-

тивления разрядного канала с контуром при его меньшей длине для повышения энерговыделения в первый полупериод колебаний тока на ~15 %.

3. Доказана возможность разрушения твердых крупногабаритных блоков естественного и искусственного происхождения размером до 100×60×60 см с использованием полиэтиленового картриджа в качестве передающей ударно-волновые возмущения среды при запасенной энергии ~30 кДж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. — Л.: Наука, 1987. — 189 с.
2. Юткин Л.А. Электродинамический эффект и его применение в промышленности. — Л.: Машиностроение, 1986. — 253 с.
3. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. — Киев: Наукова думка, 1986. — 208 с.
4. Burkin V.V., Kuznetsova N.S., Lopatin V.V. Dynamics of electro burst in solids: I. Power characteristics of electro burst // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2009. — V. 43. — P. 185–204.
5. Кузнецова Н.С., Буркин В.В., Голодников В.В., Перков В.В. Акустические возмущения в конденсированных средах при

инициировании разряда электровзрывом проводника // Известия вузов. Сер. Физика. — 2007. — № 9. Приложение. — С. 372–375.

6. Маршак И.С., Дойников А.С. Импульсные источники света. — М.: Энергия, 1978. — 478 с.
7. Kuznetsova N.S., Burkin V.V., Lopatin V.V., Zhgun D.V. Electro discharge Demolition of Concrete blocks with breakdown initiation by Exploding wire // Proc: 16th Intern. Symp. of High Current Electronics — Tomsk, September 19–24, 2010. — Tomsk: Publishing House of the IOA SB RAS, 2010. — P. 549–552.

Поступила 24.02.2012 г.

УДК 620.179.14

РАСЧЁТ РАЗМАГНИЧИВАЮЩЕГО ФАКТОРА ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ В МАГНИТОПОРОШКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

К.А. Лаптева, И.И. Толмачёв*

Томский политехнический университет

*ООО «Аттестационный региональный центр специалистов неразрушающего контроля», г. Томск

E-mail: k_senya@sibmail.com

Теоретически обоснован расчёт размагничивающего фактора для бесконечно длинного стержня квадратного сечения и образцов цилиндрической формы, намагниченных вдоль оси, при продольном намагничивании в магнитном контроле, включая магнитопорошковую дефектоскопию. Представлена программа, с помощью которой можно производить расчёты размагничивающего фактора, учитывая различные соотношения длины и диаметра контролируемых образцов.

Ключевые слова:

Магнитное поле, намагниченность, программа, размагничивающий фактор, индукция.

Key words:

Magnetic field, magnetization, program, degaussing factor, induction.

Тема расчёта и влияния размагничивающего фактора на режим намагничивания рассматривалась достаточно редко. В публикации [1] был более подробно рассмотрен расчет центрального коэффициента намагничивания цилиндрических ферромагнитных стержней при насыщении магнетика, представлен вывод формул. Позднее в работе [2] Э.С. Горкунов и В.А. Захаров более подробно рассмотрели влияние геометрических размеров ферромагнитного стержня на коэффициент размагничивания при насыщении магнетика. И уже в 2006 г. В.А. Зембеков написал диссертацию [3], в

которой рассмотрел зависимость режима намагничивания цилиндрических стержней от баллистического (центрального) и магнитометрического коэффициентов размагничивания. Опираясь исходными данными, кажется целесообразным, разработать программу расчёта для данных коэффициентов, для более удобного использования их в магнитопорошковой дефектоскопии.

При намагничивании во внешнем поле образца или детали из ферромагнитного материала разомкнутой формы на его краях образуются магнитные полюсы, создающие внутри образца магнитное по-